基于能值生态足迹模型的榆林市水资源可持续利用研究

李晓格[1]， 张 颖[1]， 单永娟[2]

（1. 北京林业大学经济管理学院，北京 100083；2. 河北地质大学，河北 石家庄 050000）

摘 要：为研究半干旱气候区水资源的开发利用情况，以榆林市为例，根据水资源统计数据，运用能值生态足迹模型对榆林市2000—2019年水生态足迹、水生态承载力等进行综合评价，得出榆林市水资源开发利用变化特征，并与传统水生态足迹模型进行对比。结果表明：(1) 2000—2019年，榆林市水资源能值生态足迹年均值1.17 $hm^2 \cdot 人^{-1}$，水资源能值生态承载力年均值0.49 $hm^2 \cdot 人^{-1}$，生态赤字明显，且呈增加趋势；(2) 榆林市水资源生态压力指数年均值2.43，处于亚安全状态；(3) 水资源生态经济协调指数年均值1.31，相对比较稳定；传统水资源生态足迹中万元GDP水足迹年均值从0.97 $hm^2 \cdot (10^4元)^{-1}$下降到为0.04 $hm^2 \cdot (10^4元)^{-1}$，表明水资源利用效率在逐步提高。总体上看，榆林市水资源生态安全形势依然严峻，加大农业、工业节水力度，创新污水处理技术，倡导生活节水，提高水资源利用综合效率是促进榆林市水资源可持续发展的主要途径。

关键词：能值分析；水资源生态足迹；水资源生态承载力；可持续利用；榆林市

水资源的可持续利用是生态文明建设的重要一环，也是资源环境研究的主要内容[1]。纵观国内外研究，关于水资源可持续利用的研究成果较多，研究区域大到国家，小到县市；研究内容涉及水资源生态安全、可持续利用、优化配置、水资源管理及政策等；应用较广泛的研究方法有水足迹法[2-4]和水生态足迹法[5-18]。水生态足迹是在传统生态足迹法的基础上增加了水资源的用途和功能，是目前国内最常用的方法。很多学者利用水生态足迹法对我国南方地区如江苏[7]、浙江[8]、广西[9]等省，东北地区如辽宁[10]、吉林[11]等省，中西部地区如山西[12]、陕西[13]、陕北地区[14]等区域的水资源开发利用情况进行分析，并提出针对性的建议。此外，学者们还对模型进行了改进，更准确地反映区域水资源的真实开发利用情况，如引入区域水资源均衡因子和产量因子[15]，提出水生态足迹广度和深度[16]的概念，构建三维生态足迹模型[17]。还有学者将水资源生态足迹法与脱钩理论融合，分析水资源环境与经济发展协调性关系[18]。但是水资源生态足迹模型选取的参数大多以全球性均衡因子和产量因子为主，没有考虑到区域差异和时间差异，会使计量结果与实际情况产生误差。后来有学者将能值理论引入到生态足迹模型中，并经过不断实践和应用，发展成为较系统的能值生态足迹模型。如黄显峰等[19]利用能值理论分析了生态供水的供水效益影响，吕翠美等[20]通过能值理论分析了水资源对农业生产的贡献，黄晓荣等[21]利用能值模型编制了水资源的资产负债表，王慧亮等[22]基于能值理论对黄河流域水资源生态系统进行评价。能值理论通过太阳能值转换率将不同种类的能量转换为统一的太阳能值，统一之后各种形式的能量均可进行定量分析研究，真实反映生态环境与经济社会发展之间的关系。与传统水资源生态足迹模型相比，水资源能值生态足迹模型以太阳能值转换率为参数，统一系统中各种能值流，能够更加准确地模拟区域水资源开发利用的动态变化趋势。因此，采用此方法对榆林市水资源可持续利用进行分析有一定的价值和意义。

收稿日期：2021-12-01； **修订日期：**2022-03-14

基金项目：河北省社科基金项目“乡村振兴战略下乡村生态系统服务价值评估研究”（HB19YJ050-2019）

作者简介：李晓格（1988-），女，博士研究生，研究方向为森林资源核算与环境经济. E-mail: lixiaoge88@163.com

通讯作者：张颖. E-mail: zhangyin@bjfu.edu.cn

1 研究区域与数据方法

1.1 研究区概况

榆林市位于陕西北部，地貌以风沙草滩区、黄土丘陵沟壑区为主，属于半干旱气候区，生态环境脆弱。近20 a榆林市年均降水量为455.33mm。根据陕西省水资源公报数据显示，榆林市淡水总面积1386.67 hm^2，多年平均（2000—2019年）自产水资源总量为 22.14×10^8 m^3，其中地表水资源量为 15.50×10^8 m^3，地下水资源量为 15.92×10^8 m^3，重复量为 9.28×10^8 m^3。2019年榆林市人均水资源量和耕地平均水资源量分别为548 $m^3\cdot$人$^{-1}$和2670 $m^3\cdot hm^{-2}$是全国平均水平的26.43%、12.43%，人均水资源量低于国际公认的缺水线1000 m^3，属于资源型缺水地区。近年来，榆林市持续推进经济社会发展和生态文明建设，城镇化、工业化进程加快，水资源供需矛盾加剧[23]，准确评估榆林市水资源开发利用现状是当地生态环境建设科学决策的基础，有利于推动榆林市及半干旱荒漠区生态经济的可持续发展。

1.2 数据来源

榆林市下辖1市、2区、9县，以榆林市整体平均情况为统计依据，选取2000—2019年近20 a的数据。水资源能值生态足迹模型中水资源数据来自陕西省水利厅《陕西省水资源公报》，包括榆林市年均水资源总量、年均用水量。污染用水主要以化学需氧量（COD）或氨氮的废水排放量为主，数据来自《陕西省统计年鉴》；其他数据如地区生产总值（GDP）、户籍人口数量、区域面积、降雨量等来自《榆林市统计年鉴》。能值转换率主要来自相关参考文献。

1.3 研究方法

1.3.1 水资源能值生态足迹模型

（1）水资源能值生态足迹

水资源能值生态足迹模型是融合了能值理论和生态足迹模型而构建的，主要包括两部分，即用水量生态足迹和水质生态足迹。其中用水量生态足迹包括5类，即农业用水、工业用水、城镇公共服务用水、居民生活用水、生态用水；水质生态足迹为将污染物稀释至某标准的水资源消耗[18]，也称为污染足迹。计算方法[1]为：

$$EEF_w = EEF_k + EEF_q \tag{1}$$

$$EEF_k = \sum_{i=1}^{n} \frac{C_{ki}}{P_w} \tag{2}$$

$$C_{ki} = \frac{E_{ki}}{N} \tag{3}$$

$$E_{ki} = M_{ki}\tau_{ki} \tag{4}$$

$$EEF_q = \frac{\max\left(E_{COD}, E_{NH_3-N}\right)}{NP_w} \tag{5}$$

$$E_{COD/NH_3-N} = \frac{M_{COD/NH_3-N}\rho_w}{\rho_{COD/NH_3-N}} H_\omega U_\omega \tag{6}$$

式中：EEF_w 为人均水资源能值生态足迹（$hm^2\cdot$人$^{-1}$）；EEF_k 为人均用水量生态足迹（$hm^2\cdot$人$^{-1}$）；EEF_q 为人均水污染足迹（$hm^2\cdot$人$^{-1}$）；C_{ki} 为第 i 类用水的人均太阳能值（sej·人$^{-1}$），$i=1,2,3,4,5$；E_{ki} 为第 i 类用水量的总能值（sej）；M_{ki} 为第 i 类用水量（m^3）；τ_{ki} 为第 i 类用水的太阳能值转换率（$sej\cdot m^{-3}$）；N 为榆林市人口数量；P_w 为全球平均能值密度（$sej\cdot hm^{-2}$），取值3.104E+14 $sej\cdot hm^{-2}$；E_{COD} 和 E_{NH_3-N} 代表化学需氧量（COD）和氨氮的能值（sej）；M_{COD/NH_3-N} 为COD或氨氮的废水排放量（kg）；ρ_w 为水的密度（$kg\cdot m^{-3}$）；ρ_{COD/NH_3-N} 为COD或氨氮的允许排放浓度，参照《黄河流域（陕西段）污水综合排放标准》（DB61/224–2018），COD允许排放浓度取50 $mg\cdot L^{-1}$，氨氮取12 $mg\cdot L^{-1}$；H_ω 为热值换算系数取2.56E+04 $J\cdot kg^{-1}$；U_ω 为水的单位能值（$sej\cdot J^{-1}$），由雨水化学总能值与地表水（地下水）化学能相除的多年平均值得到，计算得出，为8.54E+04 $sej\cdot J^{-1}$。计算公式如下：

$$EE_{rc} = S\times \mathrm{Rain}\times\theta\times G\times\rho_w\times\tau_{rc} \tag{7}$$

$$E_g\left(E_u\right) = M_g\left(M_u\right)\times G\times\rho_w \tag{8}$$

式中：EE_{rc} 为雨水化学能值（sej）；E_g 为地表水化学能（J）；E_u 为地下水化学能（J）；S 为区域面积（m^2）；Rain为平均降雨量（m）；θ 为蒸散系数（0.6）；G 为吉布斯自由能，雨水吉布斯自由能为4.94 $J\cdot g^{-1}$，地表水吉布斯自由能为4.94 $J\cdot g^{-1}$，地下水吉布斯自由能为4.90 $J\cdot g^{-1}$；M_g、M_u 分别为地表水、地下水水资源量（m^3）；τ_{rc} 为雨水化学能太阳能值转换率，取值1.80E+04 $sej\cdot J^{-1}$[24]。

（2）水资源能值生态承载力

水资源生态承载力是区域在一定时期一定条件下，水生态系统可承载的最大经济社会发展压力[7]。根据能值理论，榆林市水资源能值主要由雨水势能、地表水化学能、地下水化学能组成。同时考虑到水资源利用率情况，至少要扣除60%用水维持生物多样性和生态环境发展，其计算公式[1]为：

$$EEC_w = 0.4 \times \frac{EE_{rh} + EE_g + EE_u}{P_\omega N} \tag{9}$$

式中：EEC_w 为人均水资源能值生态承载力(hm²·人⁻¹)；EE_{rh} 为雨水势能值(sej)；EE_g 为地表水化学能值(sej)；EE_u 为地下水化学能值(sej)；P_ω 为榆林市水资源平均能值密度(sej·hm⁻²)，由榆林市近20 a的水资源能值除以榆林市面积的平均值得出，为2.35E+14 sej·hm⁻²。雨水势能计算方法为[24]：

$$E_{rh} = S \times \text{Rain} \times \varphi \times \rho_w \times h \times g \tag{10}$$

式中：E_{rh} 为雨水势能(J)；φ 为径流系数(0.4)；h 为平均海拔高度(m)；g 为重力加速度(9.8 m·s⁻²)。地表水和地下水化学能计算见公式(8)。

模型中主要能值转换率及相关参数数值参考来源见表1。

1.3.2 水资源可持续利用评价指标

(1) 水资源生态赤字/盈余(*ED*/*ES*)

ED/*ES* 是用来评价区域水资源的可持续利用程度及供求情况，用水资源生态承载力与水资源生态足迹的差值来表示。如果 $EEC_w < EEF_w$，则水资源出现生态赤字(ED)，表明区域社会经济发展对水资源利用超出其生态负荷，对当地水资源生态安全构成威胁；反之，说明区域水资源供给能够满足需求，有利于区域可持续发展；$EEC_w = EEF_w$ 时水资源实现生态平衡。具体计算公式如下：

$$ED(ES) = EEC_w - EEF_w \tag{11}$$

(2) 水资源生态压力指数(*EPI*)

EPI 为水资源生态足迹与水资源生态承载力的比值，用来评价水资源生态安全。当 $EPI<1$ 时，表明人类对水资源的消耗在生态承载范围之内，水资源处于生态安全状态；反之，$EPI>1$ 时，表明水资源消耗大于其供给能力，处于生态不安全状态；当 $EPI=1$ 时，表明区域水资源供需处于平衡状态(表2)。计算公式为：

$$EPI = EEF_w / EEC_w \tag{12}$$

表1 主要能值转换率

Tab. 1 Main emergy conversion rate

项目	能值转换率/(sej·m⁻³)	项目	能值转换率/(sej·m⁻³)
农业用水	1.60E+12[1]	地下水	1.70E+12[20]
工业用水	2.32E+12[1]	雨水化学能	1.80E+04[24]
生活用水	8.80E+11[1]	雨水势能	1.00E+04[24]
生态用水	1.26E+12[19]	地表水化学能	1.54E+04[24]
地表水	9.23E+11[20]	地下水化学能	8.89E+03[24]

表2 基于生态压力的区域生态安全等级分类[1]

Tab. 2 Classification of regional ecological security based on ecological pressure

生态安全等级	生态安全状态	生态压力范围
1	安全	0~1
2	亚安全	1~10
3	轻度不安全	10~18
4	中度不安全	18~24
5	高度不安全	24~30
6	极度不安全	≥30

(3) 水资源生态经济协调指数(*ECI*)

水资源生态系统与社会经济的协调发展是衡量不同时期经济发展水平与水资源开发利用程度及供求之间的关系。*ECI* 可用来度量两者之间的协调性及相互关系，计算方法为[1]：

$$ECI = \frac{(EEF_w + EEC_w)}{\sqrt{EEF_w^{\,2} + EEC_w^{\,2}}} = \frac{EPI + 1}{\sqrt{EPI^2 + 1}} \tag{13}$$

ECI 取值范围为(1,1.414)。*ECI* 越趋近1，表明水资源生态经济协调性越差；*ECI* 越趋近1.414，则说明水资源生态经济协调性越好。当 $ECI=1.414$ 时说明水资源处于生态经济最佳协调状态。

1.3.3 传统水资源生态足迹评价 为了进一步分析水资源开发情况，构建传统水资源生态足迹模型，与能值生态足迹进行差异对比。根据朱光磊等[11]传统水资源生态足迹法，计算榆林市2000—2019年水资源生态足迹。计算公式为：

$$EF_w = \gamma \times (M_{ki} / \Phi_w) \tag{14}$$

式中：EF_w 为传统水资源生态足迹(10⁴ hm²)；γ 为水资源全球均衡因子，取值5.19；Φ_w 为全球水资源平均生产能力，取3140 m³·hm⁻²。因此，水资源利用效率可用万元GDP水生态足迹表示，比值越小，表

示水资源利用效率越高,计算公式为:

$$WFG = EF_w / \mathrm{GDP} \quad (15)$$

式中:WFG 为万元GDP水生态足迹[$hm^2 \cdot (10^4元)^{-1}$];EF_w 为传统水资源生态足迹(10^4 hm^2)。

2 结果与分析

2.1 水资源能值生态足迹变化趋势

根据上述方法和数据可得,榆林市水资源能值生态足迹 EEF_w 从2000年的0.97 $hm^2 \cdot 人^{-1}$增加到2019年的1.48 $hm^2 \cdot 人^{-1}$(表3),增幅52.29%,年复合增长2.24%,呈波动上升趋势。其中,农业用水、工业用水、城镇公共服务用水、居民生活用水、生态用水、污染用水的生态足迹分别占总能值生态足迹的49.69%~72.84%、11.21%~36.47%、0.16%~1.27%、3.74%~6.10%、0~1.46%、5.13%~13.80%,这表明榆林市水资源能值生态足迹的主要贡献者是农业用水,其次是工业用水、污染用水,生态用水的贡献最少。

从6类用水账户的能值生态足迹变化趋势来看,近20 a来,工业用水、居民生活用水、城镇公共服务用水和生态用水足迹逐年增加,而农业用水、污染用水足迹有下降趋势(图1)。工业用水账户与总人均能值账户变化趋势相似,可能是导致总能值生态足迹变化的主要原因。通过水资源生态足迹可以发现,榆林市农业用水量需求较大,但农业产业对经济的贡献率不高,近年来农业用水量逐渐缩减。而工业用水量需求逐渐增加,促进工业产值增加带动经济发展。由此可见,近20 a榆林市水资源分配结构在逐步调整,促进工农业产业结构优化和升级。

2.2 水资源能值生态承载力变化趋势

从水资源供给来看,榆林市水资源主要来自雨水、地表水和地下水。2000—2019年,榆林水市水资源总能值波动范围为7.04E+20~1.41E+21 sej,总能值生态承载力呈波动上升趋势,其中2017年水资源总能值生态承载力最高,为2.35E+06 hm^2,2000年最低,为1.20E+06 hm^2(表4)。

榆林市水资源生态承载力 EEC_w 多年均值为0.49 $hm^2 \cdot 人^{-1}$,呈上下波动趋势,波动范围为0.35~0.62 $hm^2 \cdot 人^{-1}$(图2),其中雨水势能的生态承载力最

表3 2000—2019年榆林市水资源能值生态足迹

Tab. 3 Emergy ecological footprint of water resources in Yulin City from 2000 to 2019

年份	农业用水能值/sej	工业用水能值/sej	城镇公共服务用水能值/sej	居民生活用水能值/sej	生态用水能值/sej	污染用水能值/sej	总能值/sej	总能值生态足迹/hm^2	人均能值生态足迹/($hm^2 \cdot 人^{-1}$)
2000	7.49E+20	1.18E+20	1.06E+19	4.05E+19	0	1.14E+20	1.03E+21	3.33E+06	0.97
2001	7.57E+20	1.21E+20	1.14E+19	4.05E+19	0	1.19E+20	1.05E+21	3.38E+06	0.98
2002	7.76E+20	1.23E+20	1.23E+19	4.05E+19	0	1.23E+20	1.08E+21	3.46E+06	1.00
2003	7.94E+20	1.23E+20	1.76E+18	4.31E+19	0	1.28E+20	1.09E+21	3.51E+06	1.01
2004	7.92E+20	1.23E+20	2.64E+18	4.31E+19	2.52E+18	1.33E+20	1.1E+21	3.53E+06	1.01
2005	8.18E+20	1.51E+20	2.64E+18	4.58E+19	2.52E+18	1.39E+20	1.16E+21	3.73E+06	1.06
2006	8.48E+20	2.00E+20	4.4E+18	4.66E+19	2.52E+18	1.44E+20	1.25E+21	4.01E+06	1.13
2007	8.26E+20	2.53E+20	6.16E+18	4.84E+19	3.78E+18	1.5E+20	1.29E+21	4.14E+06	1.17
2008	8.56E+20	2.46E+20	7.04E+18	4.93E+19	5.04E+18	1.56E+20	1.32E+21	4.25E+06	1.19
2009	7.78E+20	3.13E+20	7.04E+18	5.1E+19	3.78E+18	1.62E+20	1.31E+21	4.23E+06	1.18
2010	7.87E+20	3.02E+20	7.04E+18	5.19E+19	3.78E+18	1.68E+20	1.32E+21	4.25E+06	1.17
2011	7.86E+20	3.83E+20	7.92E+18	5.54E+19	5.04E+18	1.7E+20	1.41E+21	4.53E+06	1.22
2012	7.89E+20	4.08E+20	9.68E+18	5.98E+19	6.3E+18	1.88E+20	1.46E+21	4.71E+06	1.26
2013	8.48E+20	4.18E+20	1.32E+19	6.6E+19	1.01E+19	1.91E+20	1.55E+21	4.98E+06	1.32
2014	7.7E+20	3.85E+20	1.41E+19	7.13E+19	1.89E+19	1.95E+20	1.45E+21	4.68E+06	1.25
2015	7.79E+20	3.71E+20	1.76E+19	7.74E+19	2.14E+19	2.03E+20	1.47E+21	4.73E+06	1.25
2016	7.97E+20	3.83E+20	1.76E+19	8.18E+19	2.02E+19	1.73E+20	1.47E+21	4.74E+06	1.24
2017	7.97E+20	4.71E+20	1.94E+19	8.8E+19	2.02E+19	1.27E+20	1.52E+21	4.91E+06	1.27
2018	7.73E+20	5.31E+20	1.94E+19	8.89E+19	2.02E+19	9.29E+19	1.53E+21	4.91E+06	1.28
2019	7.81E+20	5.73E+20	1.94E+19	9.59E+19	2.14E+19	8.06E+19	1.57E+21	5.06E+06	1.48
均值	7.95E+20	3.00E+20	1.06E+19	5.93E+19	8.38E+18	1.48E+20	1.32E+20	4.25E+06	1.17

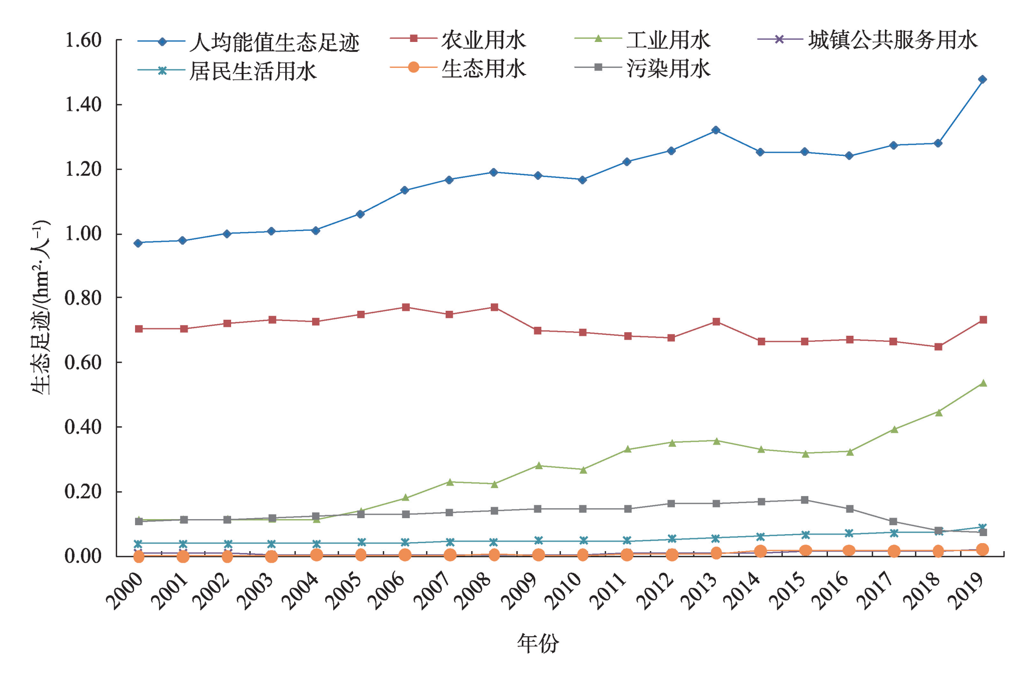


图 1　榆林市水资源能值生态足迹变化趋势

Fig. 1　Change trend of emergy ecological footprint of water resources in Yulin City

表 4　2000—2019 年榆林市水资源能值生态承载力

Tab. 4　Emergy ecological carrying capacity of water resources in Yulin City from 2000 to 2019

年份	雨水势能值/sej	地表水化学能值/sej	地下水化学能值/sej	总能值/sej	总能值生态承载力/hm²	人均能值生态承载力/(hm²·人⁻¹)
2000	5.52E+20	9.33E+19	5.84E+19	7.04E+20	1.20E+06	0.35
2001	7.88E+20	1.17E+20	8.66E+19	9.91E+20	1.71E+06	0.49
2002	7.95E+20	1.17E+20	1.05E+20	1.02E+21	1.74E+06	0.50
2003	8.2E+20	1.81E+20	5.19E+19	1.05E+21	1.86E+06	0.51
2004	8.2E+20	9.43E+19	6.41E+19	9.78E+20	1.65E+06	0.48
2005	8.2E+20	8.07E+19	6.23E+19	9.63E+20	1.63E+06	0.47
2006	8.2E+20	9.34E+19	5.55E+19	9.69E+20	1.60E+06	0.47
2007	8.2E+20	1.03E+20	7.56E+19	9.98E+20	1.63E+06	0.48
2008	7.43E+20	8.36E+19	5.59E+19	8.83E+20	1.45E+06	0.42
2009	7.91E+20	1.07E+20	6.99E+19	9.68E+20	1.58E+06	0.46
2010	6.84E+20	1.02E+20	6.82E+19	8.54E+20	1.39E+06	0.40
2011	8.37E+20	9.67E+19	6.63E+19	1.00E+21	1.65E+06	0.46
2012	9.87E+20	1.34E+20	8.36E+19	1.21E+21	1.98E+06	0.55
2013	1.06E+21	1.44E+20	6.41E+19	1.27E+21	2.11E+06	0.57
2014	8.69E+20	1.28E+20	7.07E+19	1.07E+21	1.77E+06	0.49
2015	7.71E+20	1.09E+20	6.73E+19	9.47E+20	1.56E+06	0.43
2016	1.1E+21	1.56E+20	7.62E+19	1.33E+21	2.21E+06	0.59
2017	1.18E+21	1.55E+20	7.91E+19	1.41E+21	2.35E+06	0.62
2018	9.74E+20	1.42E+20	6.57E+19	1.18E+21	1.97E+06	0.52
2019	8.26E+20	1.21E+20	6.19E+19	1.01E+21	1.68E+06	0.50
均值	8.52E+20	1.18E+20	6.94E+19	1.04E+21	1.74E+06	0.49

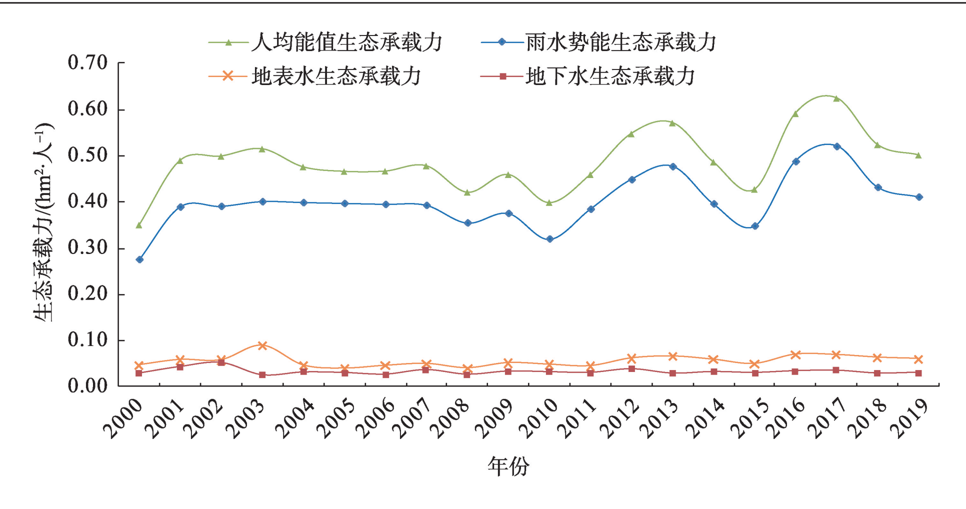


图2　榆林市水资源生态承载力变化趋势

Fig. 2　Change trend of ecological carrying capacity of water resources in Yulin City

大,是水资源能值生态承载力的主要贡献者,地表水、地下水的生态承载力相对较小。EEC_w受降雨量影响明显,统计显示,榆林市水资源生态承载力与年降雨量相关系数达0.93,说明榆林市年降雨量对水资源生态承载力具有决定性作用。

2.3　水资源可持续利用分析

(1) 水资源生态盈亏与生态压力

2000—2019年,榆林市水资源一直处于生态赤字(*ED*)的状态,且*ED*呈逐年增加趋势,从2000年的−0.62 $hm^2\cdot$人$^{-1}$增加到2019年的−0.98 $hm^2\cdot$人$^{-1}$,增幅为57.29%。人均水资源生态压力指数*EPI*呈缓慢波动形势,年际间变化幅度相对较小。*EPI*多年平均值为2.43,处于亚安全状态。其中,2019年最高,为2.95;2003年最低,为1.96(图3)。

总体来看,榆林市水资源生态赤字在扩大。虽然黄河引水工程在一定程度上缓解了榆林市的水资源赤字程度,但近年来,受气候变化和人类活动影响,黄河流域实际来水量呈明显递减趋势,同时榆林市工业化发展过快,用水需求量增加,水资源供需矛盾凸显,不利于区域生态环境的可持续发展。长期来看,榆林市水资源生态赤字将会使经济社会发展受到一定程度的制约,阻碍区域经济的发展。

(2) 水资源生态经济协调指数(*ECI*)

榆林市水资源生态经济协调性呈现上下波动趋势(图4),*ECI*波动范围为1.27~1.35,多年平均值为1.31,这说明榆林市水资源生态系统与社会经济系统的协调性相对比较稳定,通过近年来工农业产业结构调整,使水资源的利用效率不断提高。但是与最优值1.414还有一定的距离,榆林市水资源生态系统与社会经济系统之间的协调性还有待进一步提升。

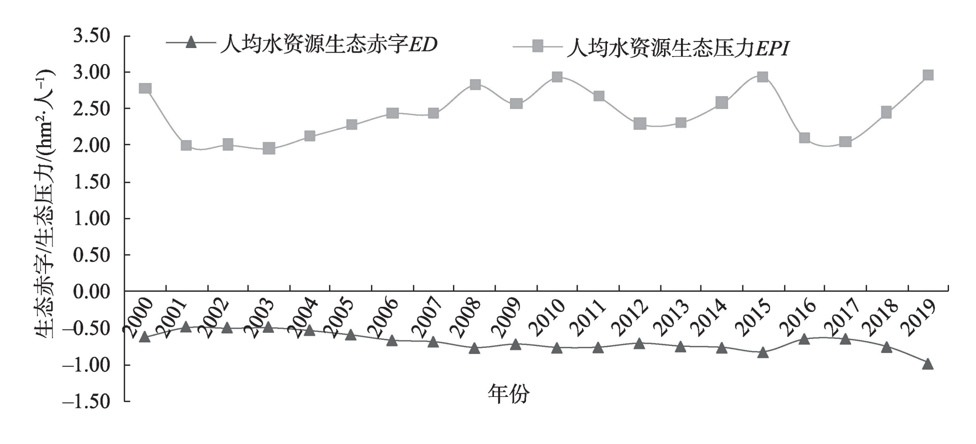


图3　榆林市水资源生态赤字与生态压力

Fig. 3　Ecological deficit and ecological pressure of water resources in Yulin city

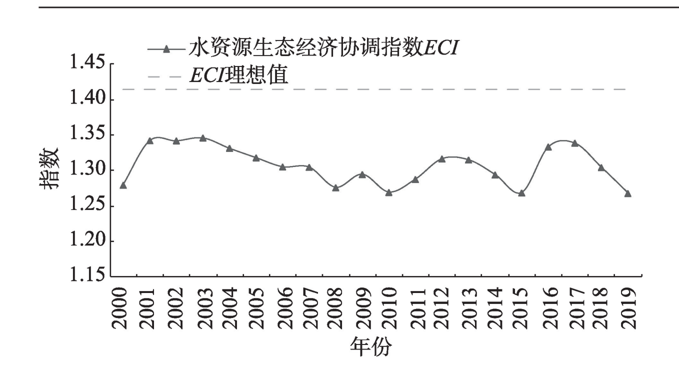


图4 榆林市水资源生态经济协调指数

Fig. 4 Eco-economic coordination index of water resources in Yulin City

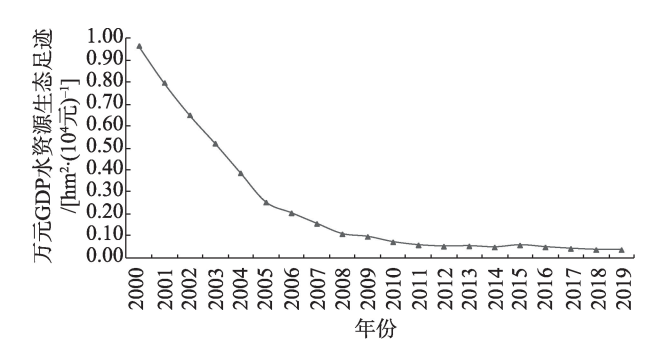


图5 榆林市万元GDP水资源生态足迹

Fig. 5 Ecological footprint per ten thousand yuan GDP of water resources in Yulin City

利用传统的万元GDP水生态足迹衡量水资源利用效率，2000—2019年榆林市万元GDP水资源生态足迹呈下降趋势(图5)，由2000年的最大值0.97 $hm^2\cdot(10^4元)^{-1}$下降到2019年的0.04 $hm^2\cdot(10^4元)^{-1}$，下降幅度达到96.16%，年均降幅15.76%，该值逐年减小，表明榆林市水源利用效率在不断提高，这与*ECI*的结论基本一致，这是榆林市水资源开发利用结构和经济产业结构调整的结果，经济增长方式的转变，提高了水资源利用效率。

3 讨 论

3.1 传统水资源生态足迹与水资源能值生态足迹的比较

从变化趋势上来看，传统水资源生态足迹与能值生态足迹均呈增长趋势，但后者数值大于前者(图6)。主要原因在于，传统水资源生态足迹计算中选取的参数为水资源全球均衡因子和全球平均生产能力，假定各类用水消耗的单位淡水资源所占用的生物生产性土地面积相同[1]；而在水资源能值生态足迹计算中，考虑到各类用水的贡献以及地区差异，能值转换系数是不同的，导致占用能力不同。因此，水资源生能值生态足迹模型更能真实反映榆林市水资源开发利用情况。

水资源生态承载力的对比结果也表明，能值生态承载力要高于传统水资源生态承载力(图7)，且能值生态承载力变化波动较大，传统水资源生态承载力波动相对缓和。主要原因在于，能值生态承载力以能量流为基础，通过太阳能值转化率可以把各种不同类型土地所提供的生态承载力纳入计算范畴，而传统生态承载力在计算当中容易忽略一些土地类型，所以能值生态承载力比传统生态承载力要高[1,19]。

3.2 榆林市水资源利用情况

2000—2019年，榆林市水资源能值生态足迹呈

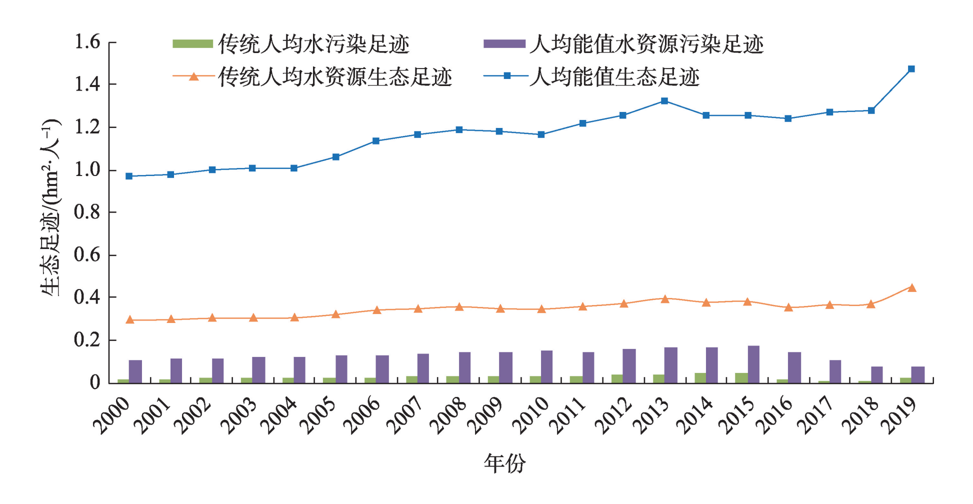


图6 榆林市水资源能值生态足迹与传统水资源生态足迹

Fig. 6 Emergy ecological footprint and tradition ecological footprint of water resources in Yulin City

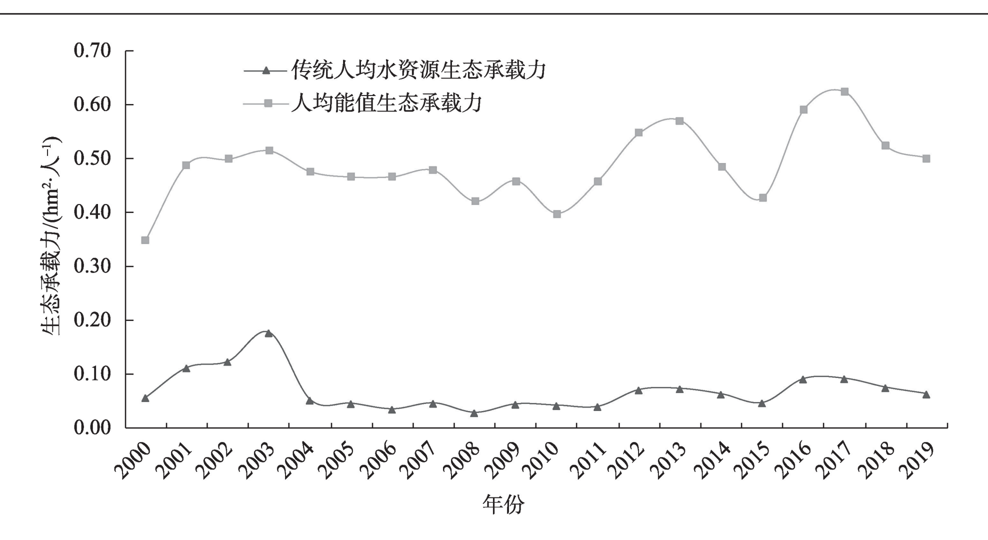


图7 榆林市水资源能值生态承载力与传统水资源生态承载力

Fig. 7 Emergy ecological carrying capacity and traditional ecological carrying capacity of water resources in Yulin City

波动上升趋势,主要受工业用水影响较大。而工业用水量与人均GDP呈显著的正相关关系,相关系数达98.68%,这说明水资源对经济发展起到良好的促进作用。农业用水生态足迹有降低的趋势,这与农业灌溉技术提升,农业种植结构调整,节省农业用水有密切关系。污染用水足迹在2015年出现转折,2015年之前是不断增长的,2016年之后开始减少,这与榆林市2016年发布的《榆林市水污染防治工作方案》有关,该方案全面控制污染物的排放,加强水污染治理力度。

榆林市 EEC_w 呈波动变化趋势,主要受降雨量影响,丰水年和枯水年对 EEC_w 的影响明显。其中2003年、2013年、2017年是降水丰年,地区水资源储量增加,EEC_w 上升。2000年、2010年是枯水年,水资源储量显著降低,EEC_w 随着下降。2017年榆林市启动了黄河引水工程,水源为黄河干流地表水,水资源储量增加。但是黄河引水水量比较固定,根据陕西省黄河可供水量分配细化方案,榆林市黄河干流分水指标为3.17×10^8 m^3,约占榆林市水资源总量的15%,近年来受气候变化和人类活动的影响,黄河流域实际来水量呈明显递减趋势,因此,通过黄河引水来增加区域水资源生态承载力已不太可行,未来可能通过人工技术干预提升水资源生态承载力才是关键。

4 结论与建议

(1) 2000—2019年,榆林市人均水资源生态足迹为0.97~1.48 hm^2·人$^{-1}$,其中,农业用水是榆林市水资源生态足迹的主要贡献者,但工业用水是导致榆林市水资源生态足迹变化的主要原因。近20 a,榆林市工业化进程加快,工业用水量增加,农业用水量在缩减,水资源利用分配结构不断优化和升级,带动经济增长。

(2) 榆林市 *ED* 和 *EPI* 年均值分别为−0.69 hm^2·人$^{-1}$和2.43,说明榆林市多年处于水资源生态赤字和生态亚安全状态;但是 *ECI* 和万元GDP水足迹年均值分别为1.31和0.23 hm^2·(10^{4}元)$^{-1}$,说明榆林市水资源生态与社会经济的协调性相对比较稳定,水资源利用效率在不断提高。

(3) 目前,榆林市水资源生态安全仍不容乐观。农业用水、工业用水量大,导致水资源利用效率低。因此,榆林市应加大农业、工业节水力度。农业方面,可以调整农业种植结构,采取先进灌溉技术,避免不必要的水资源浪费,进一步提高农业用水效率;工业方面,正向引导煤炭、化工等行业采取低污染、低耗水的生产工艺,提高工业技术水平和科技含量,减少工业发展对水环境的压力。同时注重生活用水效率的提高,建立节约用水奖励制度,普及公众节水知识,提升全民节水意识。对污染用水要通过先进技术进行循环利用,可以将处理后污水用于城市生态建设,改善水环境安全状况,实现榆林市水资源可持续发展和利用。

本文利用水资源能值生态足迹分析榆林市水资源开发利用状况,包含污染账号用水,同时考虑到区域降雨量和水资源储量的差异,增加与传统水

资源生态足迹的对比分析,结果相对较准确。但是由于资料数据有限,文中一些参数取值可能还存在一些误差,有待进一步研究。文中对传统水资源生态足迹与水资源能值生态足迹的方法也进行了讨论,并提出榆林市未来水资源利用应该考虑水资源生态承载力提升的人工干预技术等,这为未来榆林市水资源管理提供了一定的参考。

参考文献(References):

[1] 刘珂伶, 杨柳. 基于能值理论的水资源生态足迹变化特征——以北京市为例[J]. 水土保持研究, 2021, 28(3): 406–414. [Liu Keling, Yang Liu. Characteristics of water resources ecological footprint based on emergy theory: Taking Beijig as an example[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(3): 406–414.]

[2] Hoekstra A. Virtual Water Trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade[R]. Ihe Delft: Value of Water Research Report, 2003.

[3] Hoekstra A Y. Human appropriation of natural capital: A comparison of ecological footprint and water footprint analysis[J]. Ecological Economics, 2009, 68(7): 1963–1974.

[4] 张丽丽, 邓晓雅, 龙爱华, 等. 基于农业水足迹的水资源安全时空变化分析——以新疆和田地区为例[J]. 干旱区研究, 2022, 39(2): 436–447. [Zhang Lili, Deng Xiaoya, Long Aihua, et al. Spatial-temporal assessment of water resource security based on the agricultural water footprint: A case in the Hotan Prefecture of Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(2): 436–447.]

[5] 徐中民, 张志强, 程国栋. 甘肃省1998年生态足迹计算与分析[J]. 地理学报, 2000, 55(5): 607–616. [Xu Zhongmin, Zhang Zhiqiang, Cheng Guodong, et al. The calculation and analysis of ecological footprints of Gansu Province[J]. Acta Geographica Sinica, 2000, 55(5): 607–616.]

[6] 于兴丽, 陈兴鹏, 蒋莉. 甘肃省1990—2002年生态足迹的计算与分析[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(2): 100–103. [Yu Xingli, Chen Xingpeng, Jiang Li. The ecological footprint dynamic of Gansu Province from 1990 to 2002[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2007, 21(2): 100–103.]

[7] 黄林楠, 张伟新, 姜翠玲, 等. 水资源生态足迹计算方法[J]. 生态学报, 2008, 28(3): 1279–1286. [Huang Linnan, Zhang Weixin, Jiang Cuiling, et al. Ecological footprint method in water resources assessment [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(3): 1279–1286.]

[8] 李允洁, 吕惠进, 卜鹏. 基于生态足迹法的浙江省水资源可持续利用分析[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(12): 22–26, 32. [Li Yunjie, Lyu Huijin, Bu Peng. Sustainable utilization of water resources in Zhejiang Province based on ecological footprint analysis [J]. Journal of Yangta River Scientific Research Institute, 2016, 33 (12): 22–26, 32.]

[9] 张义, 张合平, 李丰生, 等. 基于改进模型的广西水资源生态足迹动态分析[J]. 资源科学, 2013, 35(8): 1601–1610. [Zhang Yi, Zhang Heping, Li Fengsheng, et al. Dynamic analysis of the water resource ecological footprint of Guangxi based on improved mode [J]. Resource Science, 2013, 35(8): 1601–1610.]

[10] 洪思扬, 王红瑞, 朱中凡, 等. 辽宁省水资源生态足迹与生态承载力分析[J]. 水利经济, 2016, 34(3): 46–52, 81. [Hong Siyang, Wang Hongrui, Zhu Zhongfan, et al. Ecological footprint and carring capacity of water resources in Liaoning Province[J]. Journal of Economics of Water Recources, 2016, 34(3): 46–52, 81.]

[11] 朱光磊, 赵春子, 朱卫红, 等. 基于生态足迹模型的吉林省水资源可持续利用评价[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(9): 131–143. [Zhu Guanglei, Zhao Chunzi, Zhu Weihong, et al. Evaluation of sustainable water resources utilization in Jilin Province based on the ecological footprint model[J]. Journal of China Agricultural University, 2020, 25(9): 131–143.]

[12] 张勇, 张治国, 董晓辉, 等. 基于ARIMA模型的山西省水资源生态足迹时间序列分析[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(22): 53–55, 59. [Zhang Yong, Zhang Zhiguo, Dong Xiaohui, et al. Time series analysis of water resource ecological footprint in Shanxi Province based on ARIMA model[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2016, 44(22): 53–55, 59.]

[13] 张淑兰, 张海军, 张盉儆, 等. 陕西省水资源生态足迹及其可持续利用分析[J]. 人民长江, 2021, 52(4): 130–136. [Zhang Shulan, Zhang Haijun, Zhang Hejing, et al. Analysis on ecological footprint of water resources in Shaanxi Province and its sustainable utilization[J]. Yangtze River, 2021, 52(4): 130–136.]

[14] 邢清枝, 任志远, 王丽霞, 等. 基于生态足迹法的陕北地区水资源可持续利用评价[J]. 干旱区研究, 2009, 26(6): 793–798. [Xing Qingzhi, Ren Zhiyuan, Wang Lixia, et al. Evaluation on sustainable utilization of water resource in North Shaanxi Province based on ecological footprint model[J]. Arid Zone Research, 2009, 26(6): 793–798.]

[15] 范月华, 陈涟, 唐文雯, 等. 基于改进水生态足迹模型的深圳市水资源可持续利用分析[J]. 水电能源科学, 2021, 39(4): 36–39, 35. [Fan Yuehua, Chen Lian, Tang Wenwen, et al. Sustainble utilization of water resources in Shenzhen City based on improved water ecological footprint model[J]. Water Resource and Power, 2021, 39(4): 36–39, 35.]

[16] 孙才志, 张智雄. 中国水生态足迹广度、深度评价及空间格局[J]. 生态学报, 2017, 37(21): 7048–7060. [Sun Caizhi, Zhang Zhixiong. Assement of water ecological footprint size, depth, and spatial pattern in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(21): 7048–7060.]

[17] 李鹏辉, 徐丽萍, 刘笑, 等. 基于三维生态足迹模型的天山北麓绿洲生态安全评价[J]. 干旱区研究, 2020, 37(5): 1337–1345. [Li Penghui, Xu Liping, Liu Xiao, et al. Ecological security evaluation of an oasis in the North of the Tianshan Mountains based on three-dimensional ecological footprint model[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(5): 1337–1345.]

[18] 王刚毅, 刘杰. 基于改进水生态足迹的水资源环境与经济发展协调性评价——以中原城市群为例[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(1): 80–90. [Wang Gangyi, Liu Jie. Coordinating evaluation of water resource environment and economic development

based on improved water ecological footprint: A case study of central Plains Urban Agglomeration[J]. Resource and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(1): 80−90.]

[19] 黄显峰, 周祎, 阎玮, 等. 基于能值分析的生态供水效益量化方法[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(2): 12−15, 36. [Huang Xianfeng, Zhou Yi, Yan Wei, et al. Quantifying benefits of ecological water supply based on emergy analysis[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(2): 12−15, 36.]

[20] 吕翠美, 周海生, 凌敏华, 等. 基于能值理论的水资源对农业生产贡献量化分析[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(4): 249−253. [Lyu Cuimei, Zhou Haisheng, Ling Minhua, et al. Quantitative analysis of water resources contribution to agricultural production based on energy theory[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(4): 249−253.]

[21] 黄晓荣, 秦长海, 郭碧莹, 等. 基于能值分析的价值型水资源资产负债表编制[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(4): 869−878. [Huang Xiaorong, Qin Changhai, Guo Biying, et al. Compilation of water resources value balance sheet based on emergy theory[J]. Resource and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(4): 869−878.]

[22] 王慧亮, 申言霞, 李卓成, 等. 基于能值理论的黄河流域水资源生态经济系统可持续性评价[J]. 水资源保护, 2020, 36(6): 12−17. [Wang Huiliang, Shen Yanxia, Li Zhuocheng, et al. Sustainability assessment of water resources ecological-economic system in the Yellow River Basin based on emergy theory[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(6): 12−17.]

[23] 惠波, 苏佳园, 惠露, 等. 榆林市水资源现状与发展对策探讨[J]. 中国水利, 2020(1): 33−35. [Hui Bo, Su Jiayuan, Hui Lu, et al. Current status of water resources in Yulin City and solutions for development[J]. China Water Resources, 2020(1): 33−35.]

[24] 蓝盛芳, 钦佩, 陆宏芳. 生态经济系统能值分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002: 75−76, 405. [Lan Shengfang, Qin Pei, Lu Hongfang. Emergy Analysis of Ecological Economics System[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002: 75−76, 405.]

Sustainable utilization of water resources in Yulin City based on an emergy ecological footprint model

LI Xiaoge[1], ZHANG Ying[1], SHAN Yongjuan[2]

(1. School of Economics & Management, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. Heibei GEO University, Shijiazhuang 050000, Hebei, China)

Abstract: Yulin City was selected as the research area to study the development and utilization of water resources in a semi-arid climate area based on water resource statistics. This paper aimed to comprehensively evaluate the water ecological footprint and water ecological carrying capacity of Yulin City from 2000 to 2019 by using the emergy ecological footprint model, to obtain the change characteristics of water resource development and utilization in Yulin City, and to compare such characteristics with those of the traditional water ecological footprint model. Results show that (1) From 2000 to 2019, the annual average value of water resource emergy ecological footprint is 1.17 $hm^2 \cdot cap^{-1}$; the annual average value of water resource emergy ecological carrying capacity is 0.49 $hm^2 \cdot cap^{-1}$, and the ecological deficit of water resources in Yulin is evident and increasing. (2) In addition, the annual average value of Yulin's water resource ecological pressure is 2.43, and it is in a semi-safe state all year round. (3) The annual average value of the water resource economic coordination index is 1.31, and the socio-economic coordination of the water resource ecosystem is relatively stable. In the traditional ecological footprint of water resources, the annual average of water footprint per 10000 yuan GDP decreased from 0.97 hm^2 per 10000 yuan to 0.04 hm^2 per 10000 yuan, indicating that the utilization efficiency of water resources is gradually improving. The state of water resource ecological security in Yulin City is relatively severe. Therefore, strengthening water conservation in agriculture and industry, innovating sewage treatment technology, advocating domestic water saving, and comprehensively improving the utilization efficiency of water resources are necessary to promote the sustainable development of water resources in Yulin City

Keywords: emergy analysis; water resources ecological footprint; water resources ecological carrying capacity; sustainable utilization; Yulin City